論文 ポーラスなセメント系材料の Ca 溶脱挙動における単位セメント量・ 骨材粒径・養生日数の影響

小野 正博^{*1}·半井 健一郎^{*2}·山田 泰彰^{*3}

要旨:本研究では、Ca溶脱の影響を顕著に受けると予想されるセメント改良土のようなポーラスなセメント 系材料について、単位セメント量(セメント添加量)、骨材粒径、材齢という3つのパラメータに着目して、 溶脱挙動を検討した。セメント添加率を3水準、骨材粒径を2水準、材齢を3水準とそれぞれ変化させ、移 流溶脱促進試験を行った。その結果、セメント添加率が4%、6%、8%の範囲では溶脱挙動はほとんど変化し ないこと、骨材粒径に着目した検討では骨材粒径が小さいほど溶脱 Ca濃度は高くなること、材齢が長期化 することで強度は増加するものの、溶脱挙動は大きく変化しないことをそれぞれ確認した。 キーワード:溶脱、セメント改良土、ポーラスコンクリート、単位セメント量、骨材粒径、長期材齢

1. はじめに

近年,軟弱地盤の改良や建設発生土の有効利用,汚泥 の固化処理などにセメントを用いる工法が増えてきてい る。軟弱地盤の固化材としてセメントを添加したセメン ト改良土は,コンクリートと比べセメント量が少なく, 連続した粗大な空隙を多く有することが特徴である。セ メント改良土では,雨水や地下水などと接する環境で使 用されることでセメント硬化体部分の Ca 等の溶脱が進 行するが,コンクリートに比べてセメント改良土では, 溶脱劣化の影響が早期に現れることが懸念される。実際 に施工後 7~13 年が経過したセメント改良地盤の調査の 結果では,表層部の強度や Ca 含有量の低下が報告され ている¹⁾。これまでに地盤工学の分野で精力的に進めら れてきた力学的視点からの研究に加え,今後は,セメン ト化学の視点を加えた耐久性の検討の必要性が高まるも のと考えられる。

また,ポーラスコンクリートは,単位セメント量が少な く,連続した粗大空隙を有するポーラスなセメント系材 料という点で,セメント改良土と類似性を有する。河川 の護岸工事,道路の路面舗装などの施工環境は Ca の溶 脱を促進する環境にあり,Ca の溶脱に対する耐久性の評 価が求められる²⁾。

ポーラスなセメント系材料の Ca 溶脱挙動を検討する ためには、様々な影響因子を検討する必要がある。まず、 実際の現場の地質や要求強度によって、地盤改良に必要 なセメント添加量が異なるため、セメント添加量が異な る改良土の溶脱挙動を把握することが必要となる。

また,地盤によって土粒子や骨材の粒径が異なること で,水の通り道である連続粗大空隙の性状が変化し,そ の溶脱挙動も変化してくることが予想される。

そして、材齢についての検討が必要である。これまで に、セメント改良土に関する長期強度の報告は多数あり、 数年間という長期間に渡って強度が継続的に増進するこ とを報告している^{たとえば 3),4)}。一般に長期の強度発現のメ カニズムは土粒子からの溶出物とセメント硬化体中の水 和物のポゾラン反応によるものとされている。セメント の水和反応により生じた Ca(OH)₂と土粒子中に含まれる シリカ質の物質が反応し、C-S-H ゲルなどを生成するこ とで長期強度を増進させているとされている。このポゾ ラン反応はセメント硬化体中の水和物の構成を変化させ るため、溶脱挙動にも影響を与えると考えられ、Ca 溶脱 の進行過程を詳細に分析する必要があると考えられる。

本研究では、ポーラスなセメント系材料としてセメン ト改良砂を対象とし、その溶脱挙動を予測するための基 礎的データを実験的に取得することを目的とした。溶脱 劣化を促進させるため、咲村らや秋岡らが行った定水位 透水試験^{5).6}による移流溶脱試験を適用し、セメント改良 土を構成する要素である、骨材、セメント硬化体、連続 粗大空隙に着目して、各要素が Ca の溶脱挙動へ及ぼす 影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

本試験ではセメント改良砂を対象とした実験を行うことにした。供試体は、 $\phi100 \times 200$ mm と $\phi100 \times 300$ mm の 2 種類の円柱供試体とした。練混ぜにはモルタルミキサを使用した。まず、骨材と水を 60 秒間練り混ぜ、その後セメントを投入しさらに 60 秒間練り混ぜた。さらに、かき

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻准教授 博士(工学)(正会員)

^{*1} 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

^{*3} 群馬大学 工学部建設工学科

表-1 セメントの化学成分

レントは苦	化学成分(%)									
セメント裡知	ig.loss	SiO ₂	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO3	Na ₂ O	K ₂ O	
OPC	2.19	20.62	5.16	2.98	64.38	1.23	2.13	0.27	0.36	

供試体名	セメント添加率	単位セメント量	W/C	材齡	平均骨材粒径	平均間隙径	粗大空隙率	動水勾配。	検討項目		
						(算定値)	(算定値)		セメント	鸟针蛤汉	++=
	(%)	(kg/m^3)	(%)	(day)	(mm)	(mm)	(%)	(m/m)	添加量	月1711111111111111111111111111111111111	们的图
T4-100-28	4	59					36.3		0		
T6-100-28	6	89	100	28	0.2	0.042	32.0	1.18	0	0	
T8-100-28	8	115	í I				30.4		0		
S6-100-28	6	110	100	28	1.0	0.125	21.1	0.05		0	
S16-25-28		265		28			21.1				0
S16-25-180	16	282	25	180			20.5				0
S16-25-360		281		360			20.6				0
S11-50-28		186		28			21.5				0
S11-50-180	11	187	50	180	1.0	0.125	21.0	0.05			0
S11-50-360		189		360			20.4				0
S6-100-28		111		28			20.2				0
S6-100-50	6	110	100	180			20.9				0
S6-100-100		111		360			20.0				0

表-2 供試体配合と実験条件

おとしを行った後60秒間練り混ぜた。打込みには、それ ぞれ質量 2.5kg のランマーを使用して突き固めをおこな った。 \$100×200mm の供試体では 3 層に分けて各層 25 回の突固めを、 \$100×300mm の供試体では 5 層に分けて 各層 23 回の突固めを、それぞれ行った。養生方法は全て の供試体で共通とし、20±3℃の室内において所定の材齢 まで封緘養生とした。セメントの化学成分を表-1に, 各供試体の配合および実験条件を表-2に示す。ここで 粗大空隙率とは、打込み後の供試体の質量、円柱型枠の 体積、各材料の単位容積質量から算出した、供試体中の 全空隙率(空気量)である。また、セメント添加率は、 各供試体の単位骨材量に対する単位セメント量の質量比 とした。骨材には Ca 含有量の少ない豊浦硅砂と相馬硅 砂3号を採用し、骨材粒径の異なる2種類を使用した。 豊浦硅砂を使用した供試体を T, 相馬硅砂を使用した供 試体をSとした。

各骨材の平均粒径および平均間隙形を表-2にあわせ て示した。ここでの平均間隙径は、神谷らが提案する次 式⁷⁾を用いて算出したものである。

$$\frac{d_e}{D_w} = \frac{1}{2}e\tag{1}$$

de: 平均間隙径(cm)

Dw: 平均粒径(cm)

e:間隙比

.

本計算における間隙比には、粗大空隙率より求まる空 隙体積と単位骨材量より算出される骨材体積を用いた。 なお、神谷らが提案した式(1)は、土粒子単体を対象とし た実験式である。よって、今回のようなセメント改良土 を対象としたものではなく、セメントを添加したことに よる空隙の減少は考慮されていない。 移流溶脱試験において,供試体 T4-100-28, T6-100-28, T8-100-28 は \$\phi100 \times 300mm の円柱供試体,その他の供試 体は \$\phi100 \times 200mm の円柱供試体を使用した。なお,供試 体 T4-100-28, T6-100-28, T8-100-28 については,後日圧 縮強度試験に供することを目的とし,供試体寸法を \$\phi100 \times 300mm の円柱供試体とした。

本研究では、3 つの観点からポーラスなセメント系材 料の溶脱挙動を分析する。まず、セメント添加率の異な る供試体 T4-100-28, T6-100-28, T8-100-28 を比較するこ とで、セメント添加率が Ca の溶脱挙動に与える影響に ついて検討する。すなわち、セメント添加率を4%, 6%, 8%(単位セメント量では58, 89, 114kg/m³)と3水準に 変化させることで、骨材周りに形成されるセメント硬化 体膜の厚さや、粗大空隙量が変化した場合の Ca の溶脱 挙動について検討を行なう。各供試体の単位骨材量を 1450±30kg/m³と統一し、セメント添加量と粗大空隙率を 変化させた。供試体の水セメント比は100%とし、実施工 で用いられるセメント改良土の水セメント比を想定した。 動水勾配は1.18と供試体間で一定にし、条件を統一させ た。透水開始材齢については28日とした。

次に、骨材粒径の異なる供試体 T6-100-28, S6-100-28 を比較することで、骨材粒径の違いが溶脱挙動に及ぼす 影響について検討する。すなわち、骨材の平均間隙径を 0.042mm と 0.125mm の 2 水準に変化させることで、水の 経路である連続粗大空隙の径が変化した場合の Ca の溶 脱挙動について検討を行なう。供試体のセメント添加率 は 6%、水セメント比は 100%とした。動水勾配は、供試 体 T6-100-28 では 1.18, S6-100-28 では 0.05 とした。供試 体 T6-100-28 と S6-100-28 では透水係数が大きく異なるこ とが予想されたため、動水勾配を変化させた。供試体の 透水開始材齢は 28 日とした。



材齢の異なる供試体 S16-25-28, S16-25-180, S16-25-360, S11-50-28, S11-50-180, S11-50-360, S6-100-28, S6-100-180, S6-100-360 を比較することで、養生日数、水セメント比 の違いが溶脱挙動に及ぼす影響について検討する。水セ メント比を, 25%, 50%, 100%の3水準とし、セメント 硬化体の細孔構造を変化させることで、Caの溶脱による 変質域の変化を再現した。材齢を 28, 180, 360 日の3 水準に設定することで、ポゾラン反応による変質状況を 変化させた。各供試体の動水勾配は 0.05 とした。供試体 の粗大空隙率は 21±1%とし,粗大空隙量が一定となるよ う供試体を作製した。粗大空隙率は、突固め具合により 変化するため、水セメント比が同じ供試体であっても、 各供試体の単位セメント量は、粗大空隙率に応じて変化 している。

2. 2 移流溶脱試験

セメント改良砂に対し定水位透水試験を行なうことで、 移流溶脱促進試験とした。作用水にはイオン交換水を使 用した。試験環境は,温度 20±3℃,湿度 60%の室内と した。透水開始前は供試体内の空隙をイオン交換水で満 たすために,減圧給水による飽和処理を行った。一定時 間ごとに流量を測定し,溶出溶液をサンプリングした。 サンプリングした溶液は原子吸光分光光度計により Ca 濃度を測定した。これによって得られた流量,Ca濃度か ら積算通水量および積算 Ca溶脱量を算出した。試験期 間は,著者らが過去に行った実験⁸⁾より,Ca濃度の低下 が安定すると思われる積算透水量 110L 以上を満たす期 間を目標とした。ただし,供試体 T6-100-28, T8-100-28 については,Ca溶脱による劣化が大きく進んだ状態まで を検討するため,目標積算透水量を 800L 以上とした。

2.3 圧縮強度試験

材齢の影響を検討するために,材齢 28 日と材齢 180 日において圧縮強度試験を行なった。水セメント比は 25%と 60%の 2 水準を対象とした。骨材には相馬硅砂 3 号を使用した。供試体は¢100×200mmの円柱供試体とし, それぞれの材齢まで 20±3℃の環境下で封緘養生とした。



図-3 液相 Ca 濃度分布(論文 6 中の図に加筆)

3. 実験結果

3. 1 セメント添加量の違いに着目した検討

(1)流量結果

セメント添加量が異なる供試体 T4-100-28, T6-100-28, T8-100-28 の透水初期である透水開始から 1 時間までの 平均流量から算出した透水初期の透水係数と,透水終了 前 1 時間の流量から算出した透水終了時の透水係数を図 -1に示す。透水初期はセメント添加率が大きいほど, 透水係数は小さくなっているが,透水終了時には差がほ とんどなくなっていることがわかる。透水係数減少の原 因としては,粗大空隙間の目詰まりなどが考えられるが, 詳細な原因はわかっておらず,今後検討が必要である。 透水開始から透水終了時にかけての透水係数の低下は供 試体 T4-100-28 で最大となった。

(2) 溶脱 Ca 溶脱濃度の推移

溶脱割合と溶脱 Ca 濃度の関係を図-2に示す。ここ での溶脱割合とは、測定した流量および Ca 濃度の積を 累積して算出した積算 Ca 溶脱量を、セメントの化学成 分と配合上の単位セメント量から求まる各供試体の総 Ca 量で除したものである。また、図中には、Buil らが提 案する Ca の固液平衡曲線⁹を破線であわせて示した。本 曲線は、固相 Ca 中の 30%が Ca(OH)₂ であると仮定して





いずれの供試体でも、透水開始時は溶脱 Ca 濃度が 10mmol/L 以下と低い値であるが、すぐに Ca 飽和濃度で ある約 22mol/L に近い値まで上昇している。芳賀らが行 ったセメントペーストを対象とする溶脱実験では、通水 試験においても溶脱の最も初期では、Ca よりも Na、K の溶出が先行することが確認されている¹⁰⁾。本実験にお いても、事前の飽和処理から透水開始直後にかけては Na や K などのアルカリイオンの溶出が卓越し、その後に Ca の溶脱が開始されたため、透水試験開始時の Ca 濃度 が低くなったと思われる。

全ての供試体で、Ca 飽和濃度に達した後、15mmol/L 程度まで緩やかに溶脱 Ca 濃度は低下した。この間は, 水和物の中で比較的溶解度の高い Ca(OH), 中の Ca が溶 脱していると考えられる。その後、急激な濃度低下がみ られ、1mmol/L以下の濃度で安定した。固液平衡曲線と 比較してみると、いずれの供試体も濃度低下のタイミン グは概ね同様の傾向を示しているが、平衡曲線とは乖離 していることがわかる。図-3に秋岡らが作成した粗大 空隙内の液相 Ca 濃度分布の概略図⁶に,移流流速の影響 を加筆したものを示す。粗大空隙内の Ca 濃度は、移流 の影響が卓越することで、セメント硬化体の界面から離 れるほど Ca 濃度が低下していると考えられる。供試体 から排出される測定溶液の Ca 濃度は、粗大空隙内を通 過する溶液濃度の平均値であることから, 固相と平衡す る Ca 濃度より低い値となると考えられる。このため、 本実験に用いた供試体では、固液平衡曲線から乖離する 結果となったと考えられる。

供試体 T6-100-28, T8-100-28 は終始同じ挙動で溶脱し ており,セメント添加率 6%と 8%では溶脱挙動に大きな 差が確認できない。供試体 T6-100-28, T8-100-28 では, 溶脱割合約 30%の時点で急激な濃度低下が確認できるの に対し,供試体 T4-100-28 では溶脱割合約 20%の時点か ら急激な濃度低下が確認できる。透水時の供試体中空隙 が飽和状態であるとし,粗大空隙率と単位セメント量よ



表-3 供試体中の作用水とセメントの液固比

供試体名	液固比 (cm ³ /g)				
T4-100-28	6.30				
T6-100-28	3.58				
T8-100-28	2.65				

り算出した,配合上の供試体中の作用水と供試体内中の セメントの液固比を表-3に示す。供試体 T4-100-28 で は,供試体中に存在する作用水とセメントの液固比がや や大きくなっていることが確認できる。液固比が大きく なることは図-4における粗大空隙の幅の増加を意味す る。このため,粗大空隙内の液相の Ca 濃度分布の平均 値が小さくなり,溶脱 Ca 濃度と固相 Ca 濃度の差が大き くなると考えられる。T6-100-28, T8-100-28 と T4-100-28 を比較したときの固液平衡状態の乖離は,この液固比に 起因するものだと推測される。セメント添加率 4%,6%, 8%の範囲では,溶脱 Ca 濃度と溶脱割合の関係に大きな 影響を及ぼさないことがわかる。

(3) 経時的な溶脱進展状況

積算 Ca 溶脱量の経時変化を図-4に示す。T4-100-28, T6-100-28, T8-100-28 とセメント添加率が大きくなるほ ど積算溶脱 Ca 量が多くなっていることが確認できる。 このことから,セメント添加量が多いほど,外部環境へ 溶脱する Ca の量が多くなることが分かる。

一方,溶脱割合の経時変化を図-5に示す。通水時間 10時間程度まではT8-100-28,T6-100-28,T4-100-28の順 に溶脱割合が大きくなっていることがわかる。すなわち, セメント添加量が少ないほど同通水時間における溶脱割 合が大きくなっている。しかし,10時間程度以降は T8-100-28,T4-100-28,T6-100-28の順に溶脱割合が大き くなっている。図-2より,3体の供試体の溶脱挙動に は大きな差がないことから,動水勾配一定の条件下では, 溶脱劣化の進行には,流量の大小を決める透水係数が支 配的であると考えられる。つまり,透水係数が大きいほ ど,溶脱が早期に進行するということになる。(1)で述べ たように,供試体T4-100-28 は透水初期から透水終了時



にかけて透水係数の低下が大きかったことが確認できている(図-1)。10時間程度以降,供試体 T4-100-28 が T6-100-28の溶脱割合を下回ったのは,透水係数の減少によるものと考えられる。以上の結果から,セメント添加 率が小さいほど,透水係数が大きくなることで Ca 溶脱 が早期に進行することがわかる。

3.2 骨材粒径の違いに着目した検討

(1) 流量結果

骨材粒径の異なる T6-100-28, S6-100-28 の全透水期間 の平均流量より算出した透水係数を図-6に示す。骨材 粒径が大きくなるほど,透水係数が大きくなっているこ とがわかる。両供試体の移流流速を算定すると, T6-100-28 で 0.057 cm/sec, S6-100-28 では 0.009 cm/sec と なっている。

(2) 溶脱 Ca 溶脱濃度の推移

供試体 T6-100-28, S6-100-28 の溶脱 Ca 濃度と溶脱割 合の関係を図-7に示す。図-2と同様に、図中に Ca の固液平衡曲線を破線で示す。T6-100-28 では比較的平衡 状態に近い状態で溶脱が進展しているのに対し, S6-100-28 では早い段階で濃度低下が起きている。本実験 では両者の移流流速が異なるが、著者らがこれまでに行 なってきた実験において、移流流速が 1.0×10⁻¹~1.0× 10⁻⁶cm/secの範囲では移流流速が速いほどCaの固液平衡 状態から乖離する⁸⁾ことがわかっている。これは、移流 流速が速くなることで、平衡 Ca 濃度であるセメント硬 化体細孔溶液中の Ca 濃度と、粗大空隙内の液相 Ca 濃度 の差が大きくなり、Caの固液平衡状態との乖離が大きく なったためと考えられる(図-3)。S6-100-28の移流流 速を T6-100-28 の移流流速まで速くした場合, S6-100-28 の曲線はより固液平衡曲線から乖離する結果になり, T6-100-28 との差は大きくなる。すまわち, 骨材粒径が小 さいほど高い濃度で溶脱が進展することがわかる。

表-2より,平均骨材粒径が大きくなると,平均間隙 径が大きくなることが確認できる。空隙量,すなわち供 試体内における作用水の容積が一定である場合,空隙径 が小さくなることで,作用水とセメント硬化体の接触比 表面積が大きくなる。そのため,骨材粒径の小さい T6-100-28で、高濃度で溶脱が進展したと考えられる。

3.3 養生日数の長期化が溶脱挙動に及ぼす影響

(1) 強度試験結果

強度試験結果を図-8に示す。いずれの水セメント比 においても材齢28日から180日にかけて強度が約1.4倍 となっている。強度増進の程度は、使用骨材などによっ ても異なると考えられるが、本実験で得られた材齢28 日を基準とした強度の増加率は、既往の研究結果³⁾と概 ね一致するものであった。このことから、今回使用した 供試体についてもポゾラン反応が起き、長期の強度増進 に寄与していると考えられる。今回の実験では、水セメ ント比による強度増加率の変化はほとんどなかった。

(2) 溶脱試験結果

材齢の影響について検討を行なう供試体の溶脱割合と 溶脱 Ca 濃度の関係を,水セメント比ごとに図-9に示 す。水セメント比 25%の供試体では,若干ではあるが, 若材齢の供試体ほど高い濃度で溶脱してきている。水セ メント比 50%の供試体では,材齢によらず溶脱挙動がほ とんど一致しているように思われる。水セメント比 100% の供試体では,試験開始材齢が 360 日の供試体では,材 齢 28,180 日供試体に比べて,比較的早い段階で Ca 濃 度が低下してきていることが確認できる。

長期養生中にポゾラン反応が発生した場合,その反応 は骨材とセメント硬化体の界面側から進展するものと考 えられる。一方, Ca 溶脱はセメント硬化体と連続粗大空 隙との界面から進展するものである⁷⁾。つまり, Ca 溶脱 が進展し,溶脱劣化範囲が粗大空隙界面から骨材側まで 及ぶほど, Ca 溶脱挙動に及ぼすポゾラン反応の影響が大 きくなるものと考えられる。供試体 T6-100-360 は水セメ ント比が 100%と高いため,セメント硬化体部分の細孔構 造が粗な供試体である。また,養生日数 360 日と長く, 最もポゾラン反応が最も進んでいる供試体である。これ ら 2 点のことから Ca の溶脱挙動がポゾラン反応の影響 を最も受けやすい供試体であったと考えられる。図-9 において,供試体 T6-100-360 が T6-100-28, T6-100-180 に比べ比較的早い段階で溶脱 Ca 濃度の低下しているの は,ポゾラン反応によってセメント硬化体中の Ca(OH)₂



が消費され、より溶解度の低い C-S-H ゲルが生成された ことによるものと推測される。水セメント比が 100%の供 試体を 360 日間長期養生することで、ポゾラン反応によ って Ca の溶脱濃度が低くなることは、長期材齢のセメ ント改良土における溶脱抵抗性の向上を示唆する結果と いえる。今後,360 日以降の養生日数の長期化、C-S-H ゲル溶脱定量のための Si の濃度測定を行うなどして、更 なる検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、ポーラスなセメント系材料であるセメン ト改良土を対象とした、移流溶脱促進試験を行なうこと で、セメント添加量、使用骨材、材齢の違いが溶脱挙動 に及ぼす影響について報告した。本研究の範囲内で以下 の知見が得られた。

- (1) セメント添加率を変化させた場合,溶脱挙動に大きな変化は見られないが,透水係数が変化することで,経時的な溶脱進行の速さが変化する。セメント添加率が小さいほど,透水係数が大きくなり,動水勾配一定条件下では,溶脱劣化速度が速くなる。
- (2) 骨材粒径を変化させ、骨材粒径が小さい場合、形成 される連続粗大空隙径が小さくなることで、水とセ メント硬化体の接触面積が大きくなり、溶脱 Ca 濃 度が高くなる。
- (3) 養生日数を180日まで長期化させた場合,長期的な 強度発現が確認されたが,水セメント比25%,50% 供試体の Ca 溶脱挙動については大きな差は確認で きなかった。水セメント比100%供試体は,ポゾラ ン反応により Ca の溶脱挙動が変化する可能性が示 唆された。
- (4) 単位骨材料に対し単位セメント量が少ないポーラ スなセメント系材料を供試体とする本実験は,幅広 い水セメント比のセメント系材料を対象とした移 流溶脱試験によって,短期間に溶脱劣化評価が可能 となることから,一般の密実なコンクリートを対象 とした溶脱劣化評価のための促進試験としても適 用できる可能性があると考えられる。

謝辞

本研究は,科学研究費補助金(萌芽研究 20656071)に より実施したものである。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 済藤聰ほか:セメント改良土の長期化学的安定性の調
 査,土と基礎, vol.53, pp.14-17, 2005.
- ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研 究委員会報告書:日本コンクリート工学協会,2003.
- 三嶋信雄ほか:安定処理土の強度特性と耐久性に及 ぼす影響,日本道路公団試験研究所報告,Vol.32, pp.10-23, 1995.
- Lalana Kongsukprasert, et al.: A Review of Ageing Effects on the Strength of Cement-Mixed Geomaterials and Concrete, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.771-772, 2006.
- 5) 咲村隆人ほか:マルチスケール空隙モデ基づくカルシ ウムイオン溶脱解析,第 59 回セメント技術大会講演要 旨, pp.146-147, 2005.
- 6) AKIOKA Yohei.et al.: MULTI-SCALE ANALYSIS OF CALCIUM LEACHING FROM CEMENTED SOIL BASED ON THERMODYNAMIC APPROACH, The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.455-460, 2006.
- 神谷浩二ほか:「空気圧入法」による砂質土の間隙径分 布の計測, 土木学会論文集 No.541/3-35, pp.189-198, 1996.6.
- 小野正博ほか:水セメント比の異なるポーラスなセ メント系材料の溶脱挙動に及ぼす移流流速の影響,
 第63回年次学術講演会公演概要集,V-331,2008.
- Buil,M.et al.:A model of the attack of pure water or undersaturated lime solutions on cement,ASTM STP 1123, pp.227-241, 1992.
- 芳賀和子ほか:セメント硬化体の溶解に伴う変質(1)遠 心力方によるセメント硬化体の通水試験,日本原子力 学会和文論文誌, Vol.1, No.1, pp.20-29, 2002.